Transport Canada Transports Canada

TP 6255E

A Guide to Light Bulb Analysis In Support of Aircraft Accident Investigation

by
M.R. Poole
and
M. Vermij

Transportation Safety Board of Canada
(formerly Canadian Aviation Safety Board)

March 1985
Reprinted with revisions: February 1991

Également disponible en français sous le titre «Analyse des filaments d'ampoule : aide à la recherche sur les accidents d'avion», TP 6255F.

105-01533/

Transport Canada / Transports Canada

PUBLICATION DATA FORM

1. Transport Canada Publication No.	2. Project No.	3. Recipient's Catalogue No.
TP 6255E	6372	

4. Title and Subtitle	5. Publication Date
A Guide to Light Bulb Analysis in support of aircraft accident investigation	March 1985. Reprinted with revisions, February 1991
	6. Performing Organization Document No.
7. Author(s)	8. Transport Canada File No.
M.R. Poole, M. Vermij	D1455-129-5
9. Performing Organization Name and Address	10. PWGSC File No.
Transportation Safety Board of Canada Engineering Branch P.O. Box 9120 Alta Vista Terminal Ottawa, Ontario K1G 3T8	14SD.T8200-4-4572
	11. PWGSC or Transport Canada Contract No.
	T8200-4-4572
12. Sponsoring Agency Name and Address	13. Type of Publication and Period Covered
Transportation Development Centre (TDC) 800 René Lévesque Blvd. West Suite 600 Montreal, Quebec H3B 1X9	Instruction Manual
	14. Project Officer
	B. Myers

15. Supplementary Notes (Funding programs, titles of related publications, etc.)

The information contained in this manual is extracted from "Light Bulb Filament Impact Dynamics" (TP 6254E), May 1985.

16. Abstract

This manual is intended to assist aircraft accident investigators in the analysis of light bulb filaments. It describes and illustrates hot and cold bulbs subjected to controlled impact simulating an aircraft crash, and is based on a cooperative research program conducted by the Transportation Development Centre and the Aviation Safety Engineering Branch of the Canadian Aviation Safety Board (now the Transportation Safety Board of Canada).

17. Key Words	18. Distribution Statement
Aircraft, accident, crash, light bulb filament	

19. Security Classification (of this publication)	20. Security Classification (of this page)	21. Declassification (date)	22. No. of Pages	23. Price
Unclassified	Unclassified	—	vi, 26	—

Transports Canada | Transport Canada

FORMULE DE DONNÉES POUR PUBLICATION

1. N° de la publication de Transports Canada	2. N° de l'étude	3. N° de catalogue du destinataire
TP 6255E	6372	

4. Titre et sous-titre	5. Date de la publication
A Guide to Light Bulb Analysis in support of aircraft accident investigation	Mars 1985. Réimpression avec révision, février 1991
	6. N° de document de l'organisme exécutant
7. Auteur(s)	8. N° de dossier - Transports Canada
M.R. Poole, M. Vermij	D1455-129-5
9. Nom et adresse de l'organisme exécutant Bureau de la sécurité des transports du Canada Direction de l'ingénierie C.P. 9120 Alta Vista Ottawa, Ontario K1G 3T8	10. N° de dossier - TPSGC 14SD.T8200-4-4572
	11. N° de contrat - TPSGC ou Transports Canada T8200-4-4572
12. Nom et adresse de l'organisme parrain Centre de développement des transports (CDT) 800, boul. René-Lévesque Ouest Bureau 600 Montréal (Québec) H3B 1X9	13. Genre de publication et période visée Manuel
	14. Agent de projet B. Myers

15. Remarques additionnelles (programmes de financement, titres de publications connexes, etc.)

Les informations contenues dans ce manuel sont tirées du rapport intitulé «Light Bulb Filament Impact Dynamics» (TP 6254E), mai 1985.

16. Résumé

Ce manuel s'adresse aux personnes chargées des enquêtes sur les accidents d'avion et concerne la technique d'investigation par analyse des filaments d'ampoule. Il décrit, illustrations à l'appui, le mécanisme de rupture des filaments d'ampoule chauds et froids soumis à des impacts contrôlés simulant les conditions d'un écrasement. Il est le fruit d'un programme de recherche mené conjointement par le Centre de développement des transports et la Direction technique de sécurité aérienne du Bureau canadien de la sécurité aérienne (maintenant le Bureau de la sécurité des transports du Canada).

17. Mots clés	18. Diffusion
Aéronefs, accidents, écrasements, filaments d'ampoule	

19. Classification de sécurité (de cette publication)	20. Classification de sécurité (de cette page)	21. Déclassification (date)	22. Nombre de pages	23. Prix
Non classifiée	Non classifiée	—	vi, 26	—

Foreword

The major factor in the decision to conduct extensive research into aircraft light bulb behaviour under impact was the realization of the potential of light bulb filament investigation as an aid to aircraft accident investigation.

This manual was derived from "Light Bulb Filament Impact Dynamics" (TP 6254E), which describes the research conducted under controlled impact conditions by the Aviation Safety Engineering (ASE) Laboratory of the Canadian Aviation Safety Board (now the Transportation Safety Board of Canada).

There is a substantial body of knowledge on the behaviour of automotive light bulbs on impact, but this is based largely on direct impact on the bulbs themselves, whereas the research covered here is based largely on filament behaviour under inertia forces.

Table of Contents

1. Purpose 1
2. Factors Affecting Filament Damage 2
3. Type of Bulb 3
4. Orientation of Bulb 4
5. Applied Voltage 6
6. Nature and Severity of Impact 8
7. Degree of Aging 9
8. Post-impact Analysis 12
9. Illumination Times 21
10. Procedures 22
11. Final Analysis 24

List of Figures

Figure 1 Aircraft Light Bulb Configurations 5
Figure 2 Examples of Burn-Out 7
Figure 3 Impact Characteristic Curve 8
Figure 4 Filament Notching 10
Figure 5 Filament After Impact 13
Figure 6 Filament Excited by Resonance 17
Figure 7 Cold Fractures 18
Figure 8 Hot Fractures 19
Figure 9 Age vs. Impact Boundaries 20
Figure 10 Light Bulb Analysis Field Information Sheet 25
Figure 11 Light Bulb Analysis Laboratory Checklist 26

1. Purpose

The analysis of annunciator panel, warning and illumination light bulbs can lead to the determination of the state ("on" or "off") of each bulb immediately prior to impact; this analysis is an important facet of aircraft accident investigation.

This information may be used to infer:

1. aircraft operating parameters prior to impact;
2. a qualitative appreciation of the severity of impact.

A three-stage investigation is envisaged:

1. an on-site first look and removal of bulbs from the aircraft;
2. a microscopic examination by a regional laboratory to determine the nature and scope of filament deformation;
3. a detailed analysis by a specialized laboratory.

2. Factors Affecting Filament Damage

The various factors to be taken into account in analyzing aircraft light bulbs are listed below; each is discussed in some detail with appropriate illustrations on subsequent pages:

1. type and manufacturer of bulb;
2. orientation of the bulb relative to the flight path at impact;
3. applied voltage during the accident sequence;
4. nature and severity of impact;
5. degree of aging.

3. Type of Bulb

Three configurations of aircraft light bulbs in common use are illustrated in Figure 1.

The most common type in current use has a single coil filament and two support posts, and is exemplified by types 327 and 313 bulbs. The type 327, manufactured by General Electric, is used in many annunciator panels and is the type used extensively in the research program.

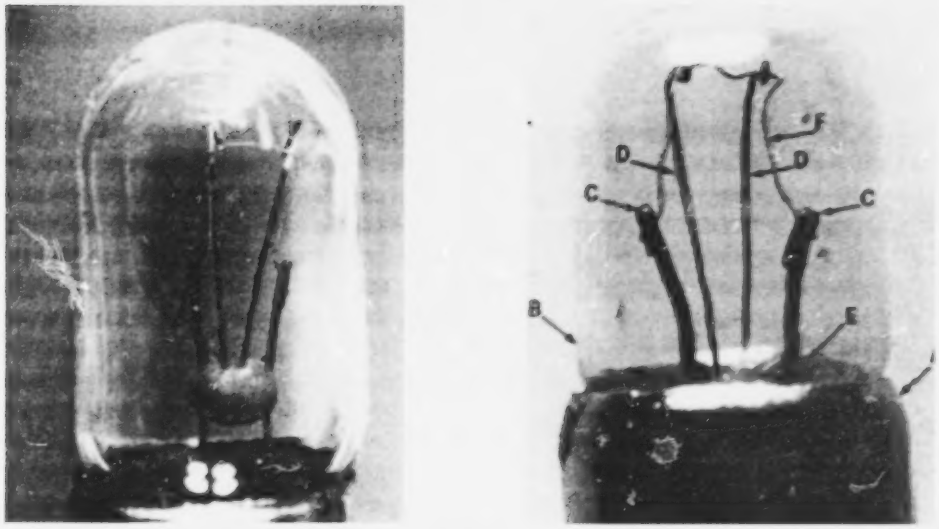
Differences in design and manufacturing processes as well as in bulb configuration could produce impact damage that differs in certain details, but the fundamental principles may be used with discretion in analyzing aircraft bulbs other than the GE327.

The filament material used by the major manufacturers was found on analysis to be 99.98% tungsten. Material properties may differ substantially, however, from bulb to bulb due to microstructural changes, dopants and manufacturing processes.

4. Orientation of Bulb

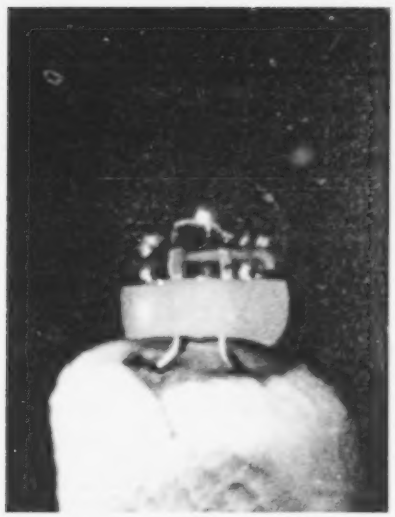
The vibratory motion of support posts under impact, particularly in resonance, has a profound influence on the behaviour of the filament they are supporting. All tests were conducted so that the most severe motion of the support posts occurred, i.e. with the direction of local impact in the plane of the posts and perpendicular to the posts.

When impact occurs under any other orientation, the motion of the posts is reduced for a given impact or, conversely, a greater impact would be required to produce the same magnitude of motion.



SINGLE HELIX FILAMENTS – SUPPORTED
GE-31[illegible] (left) and GE-327 (right), showing internal components

A - base
B – glass envelope
C – contact posts
D – support posts
E – glass bead
F – filament



SINGLE HELIX FILAMENT
unsupported

DOUBLE HELIX FILAMENT
supported

Figure 1 Aircraft Light Bulb Configurations

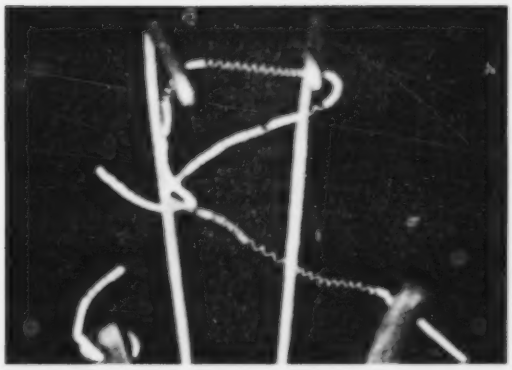
5. Applied Voltage

With few exceptions, all of which are suitably annotated, this manual is based on a 28 volt d.c. electrical system which is used on a substantial number of general aviation aircraft. Filament behaviour under inertia forces is significantly different with and without the voltage applied.

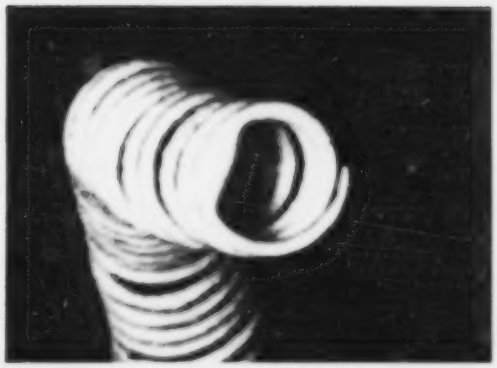
With voltage applied, the filament is hot and relatively ductile; without voltage applied, the filament remains cold and relatively brittle. Under inertia forces, therefore, a hot filament may permanently deform whereas a cold filament will generally not. Deforming of the filament while the turns remain tightly coiled is defined as "general deformation"; whereas uncoiling of individual turns is defined as "local deformation (stretch)". Examples of both types of deformation appear throughout this manual.

When a hot filament flails violently during the impact sequence, two or more parts may touch causing a short circuit, which often causes burn-out, as illustrated in Figure 2.

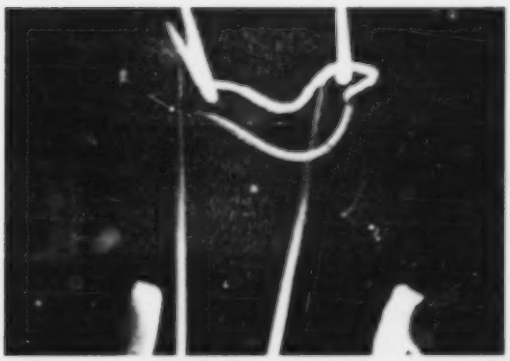
An electrical system fault, not necessarily related to crash impact, may be experienced at any time and may also cause burn-out as illustrated in Figure 2. A burn-out of this nature (high-voltage) exhibits no filament deformation, and typically fractures at one or both contact posts. Burn-out at normal applied voltage, unrelated to crash impact, may occur as a result of local overheating due to severe notching (aging), as illustrated in Figure 2.



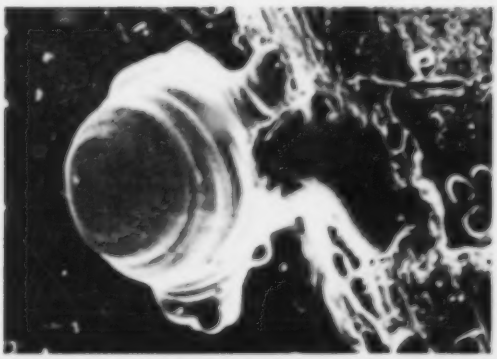
Short-circuited filament (x17) showing both general and local deformation.



Close-up of same filament (x350) showing characteristic "aneurism".



Result of severe over-voltage (x21) typical of electrical system fault showing fractures at both contact posts.



Close-up of single contact post (x700); note signs of melting.

Typical burn-out (x30) due to severe notching (aging). In this example notching was accelerated by applying 38 volts d.c. Note rounded fracture edges and "aneurism".

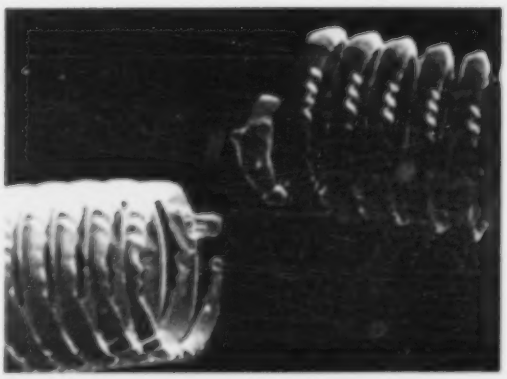


Figure 2 Examples of Burn-Out

6. Nature and Severity of Impact

In a crash, the kinetic energy of the aircraft is reduced to zero by a combination of deceleration or "g" forces acting over a period of time; the former may reach peaks of several thousand g and the latter may vary from a fraction of a millisecond to several seconds. It is common practice to refer to an average g level acting on the aircraft as a whole during the accident sequence, but local g levels, e.g. those on the instrument panel, are typically different from this average. It is these local g forces that affect the condition of the light bulb.

Figure 3 illustrates the relationship between g level and time for a typical impact.

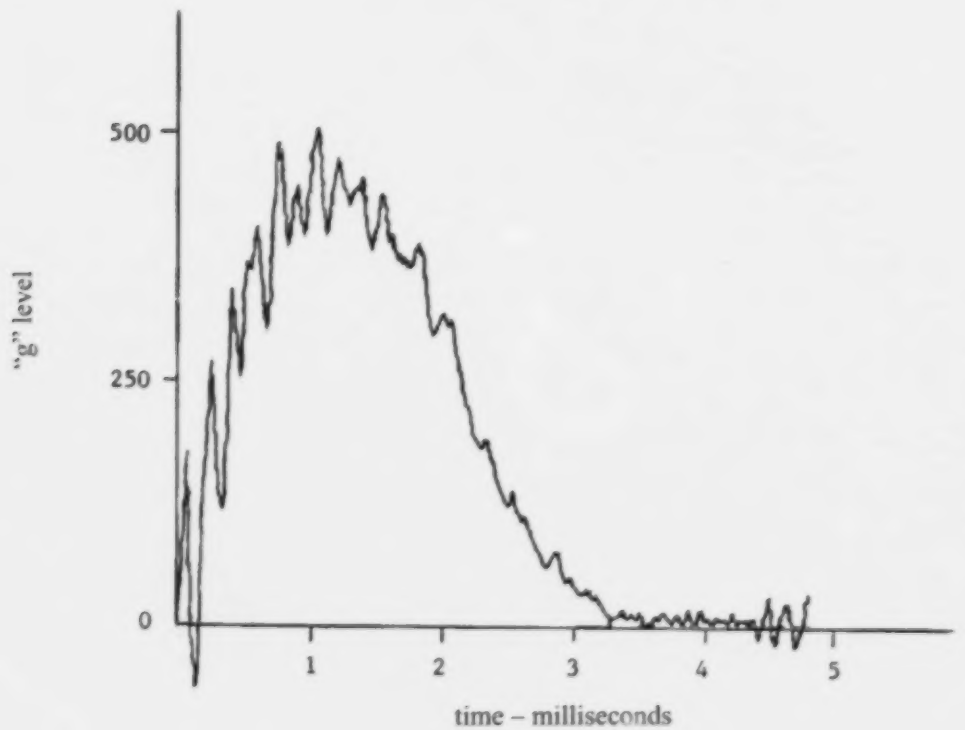


Figure 3 Impact Characteristic Curve

7. Degree of Aging

When d.c. voltage is applied to a tungsten filament, two significant aging processes occur:

1. Certain crystals within the filament grow at the expense of smaller crystals; this results in an overall reduction in the number of crystals, and a loss of strength.

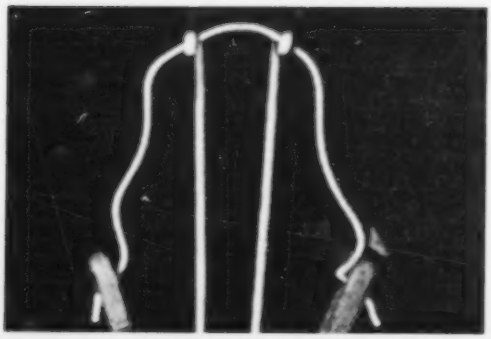
2. Tungsten ions begin to migrate within the filament to preferred crystal planes; this is visible as notching.

Notching occurs over the entire length of the filament except in the immediate vicinity of the contact and support posts where the local temperatures are reduced due to the heat sink effect. The severity of notching increases with time, and local cross-sections gradually become smaller. Thus crystalline changes and notching both act to reduce filament strength with time.

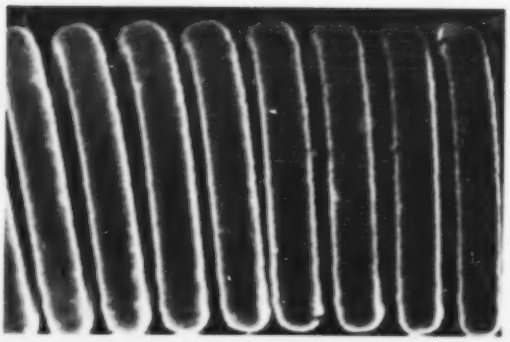
The development of notching is a complex function of applied voltage; the process may be slowed down by reducing voltage or accelerated by increasing voltage.

Applied a.c. voltage does not cause notching, except in the vicinity of heat sinks (support and contact posts) where temperature gradients exist.

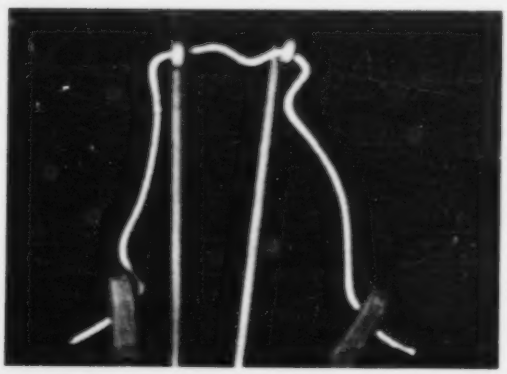
Examples of notching and other aging characteristics are shown in Figure 4. The aging hours refer to exposure to "worst case" cockpit vibration based on flight measurements, with 28 volts d.c. applied.



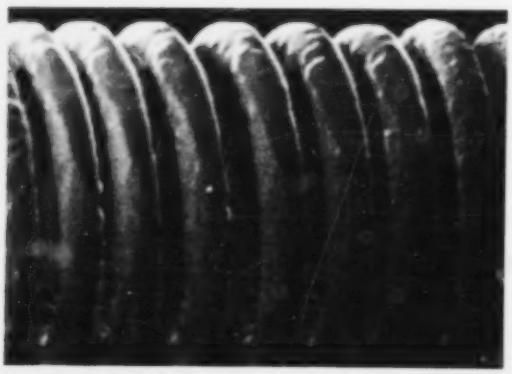
New filament (x14), showing smooth overall contour.



Same filament (x700), showing smooth surface.

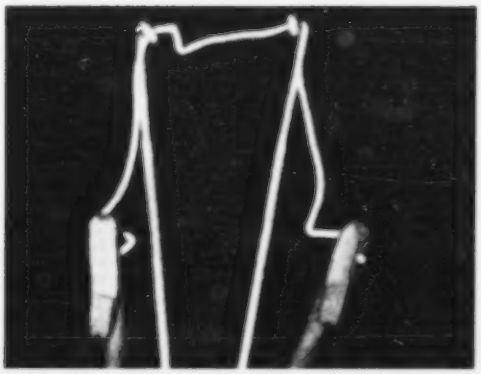


Filament (x14), aged 144 hours, showing distortion in vicinity of support posts.

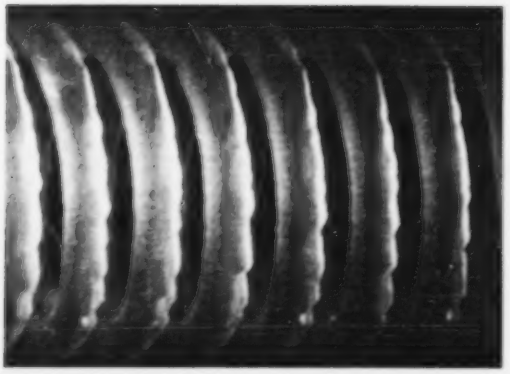


Same filament (x700), showing relatively light surface notching.

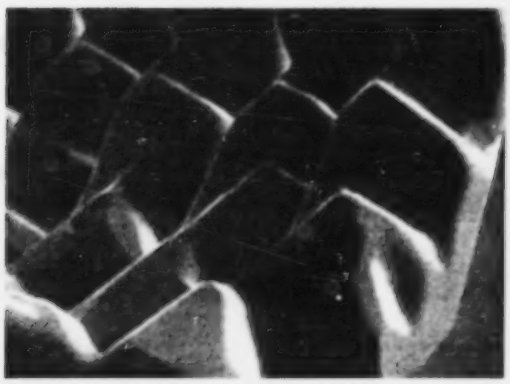
Figure 4 Filament Notching



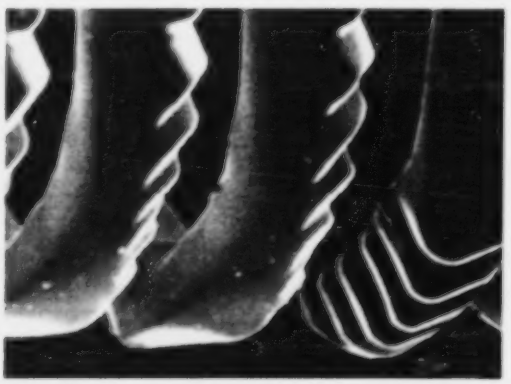
Filament (x14), aged 250 hours, showing more pronounced distortion in the vicinity of support posts.



Same filament (x700), showing growth of notching.



Severely notched filament (x1750), after 500 hours aging.



Severely notched filament (x1750) after 77 hours aging at 38 volts d.c., illustrating the relationship between notching severity and applied voltage.

Figure 4 Filament Notching (cont'd)

8. Post-impact Analysis

This section is devoted to the characteristics that appear following impact; these may be analyzed in order to deduce some of the aircraft parameters during and immediately before impact.

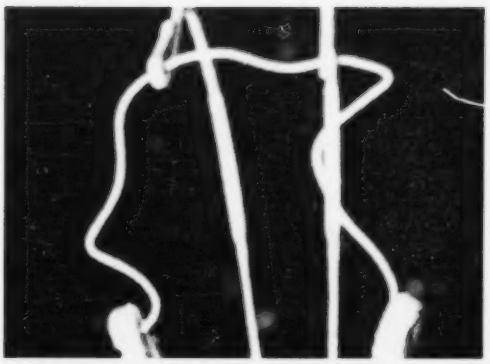
Figure 5 illustrates the interrelationships between applied voltage, aging and impact severity.

The added effect of resonance is illustrated in Figure 6. This elusive characteristic will appear whenever a bulb is exposed to frequencies close to the natural frequencies for the support post-filament system. More importantly, a single impact of short duration (equal or shorter than the natural frequencies) will cause excitation of the support post-filament system.

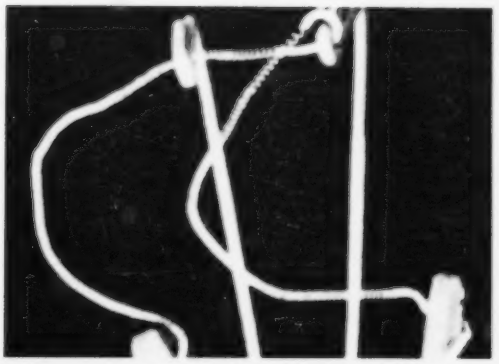
The distinctive appearance of cold fracture faces is illustrated in Figure 7, while the characteristics of filaments that have experienced hot fracture are shown in Figure 8.

Damage boundary curves for hot and cold filaments are shown in Figure 9. These were derived from test data and show clearly the higher threshold of cold bulbs with low age.

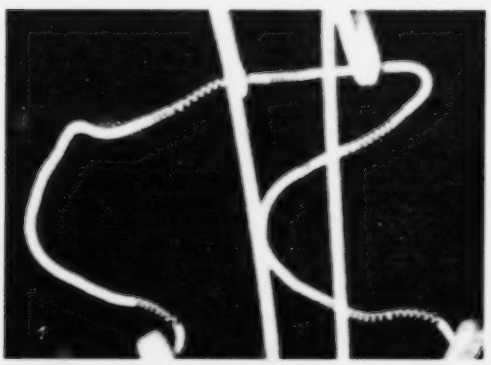
Section 9 presents notes on illumination times to add to the array of facts at the disposal of the investigator conducting the analysis.



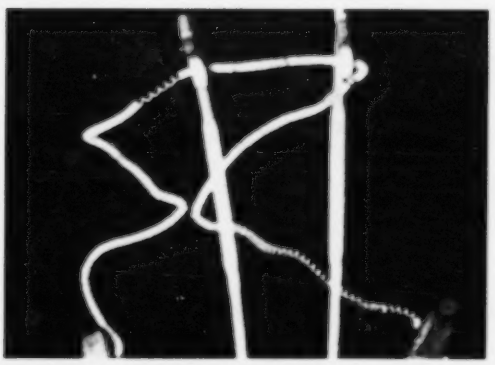
New filament.
Note general deformation only.



48 hours age. Note greater general deformation and some local stretch.



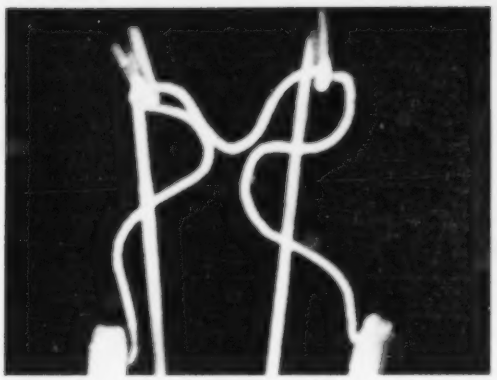
85 hours age. Note increased general deformation and some local stretch.



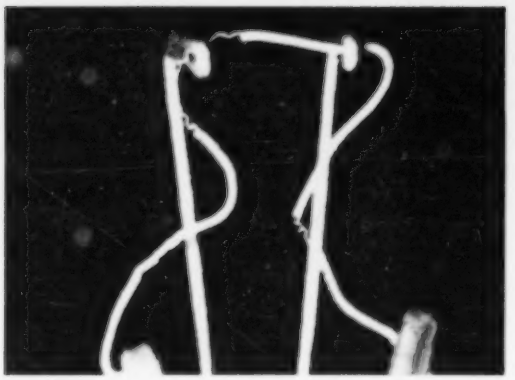
144 hours age. Note severe general deformation and increase in local stretch.

TEST PARAMETERS
1800 g
1.0 msec
28 volts d.c.
x21 mag.

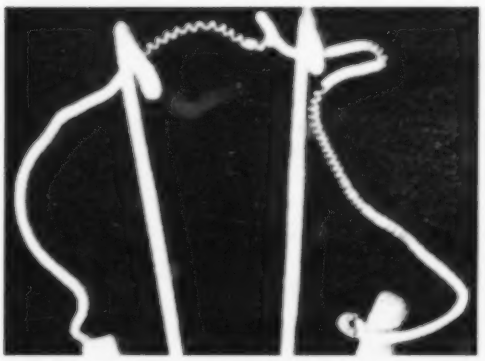
Figure 5 Filament After Impact



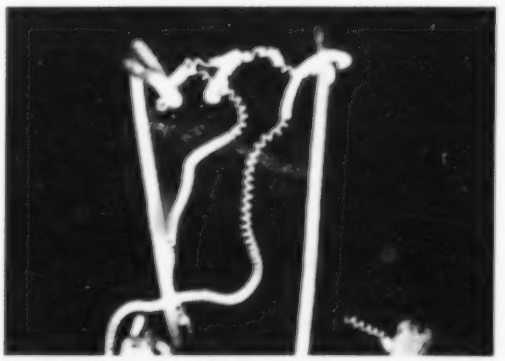
New filamant. General deformation greater than on previous page because of more severe impact; negligible local stretch.



48 hours age. General deformation and local stretch more evident.



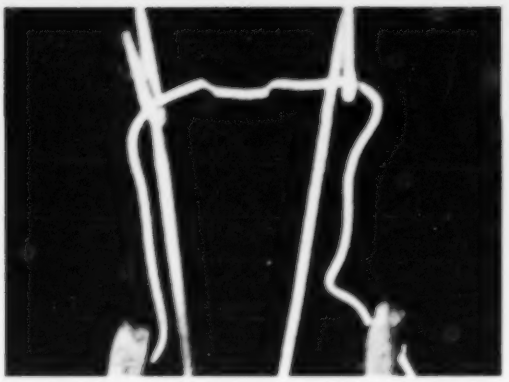
85 hours age. Increase in general deformation and local stretch.



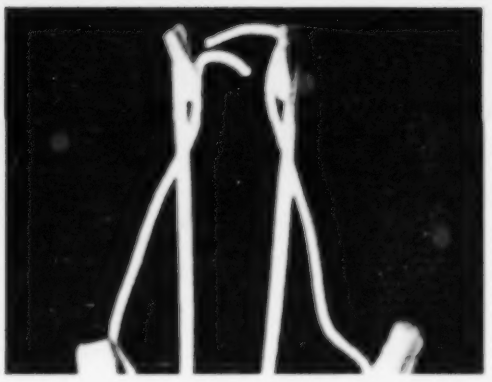
144 hours age. Note extreme general deformation, local stretch and fracture.

TEST PARAMETERS
3500 g
1.0 msec
28 volts d.c.
x21 mag.

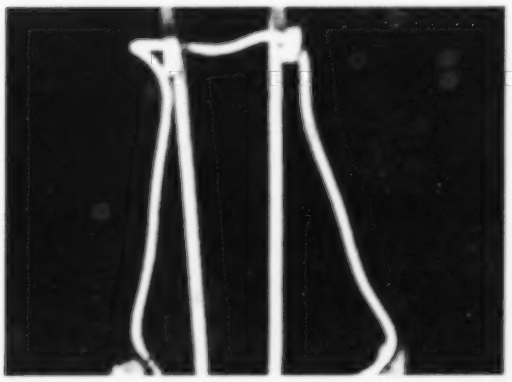
Figure 5 Filament After Impact (cont'd)



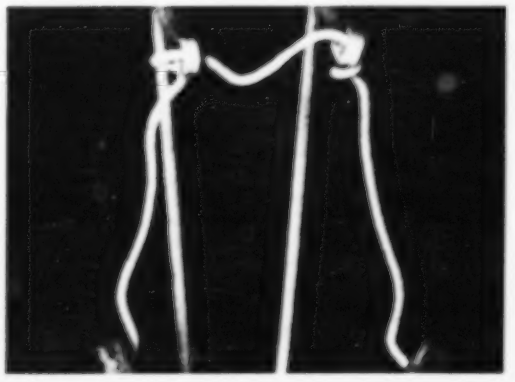
New filament. No sign of general deformation or local stretch due to impact. Slight abnormality in centre of filament attributed to manufacturing process.



48 hours age. No deformation evident, but cold fracture has occurred. Generally bulbs of this age experiencing this impact do not fracture.



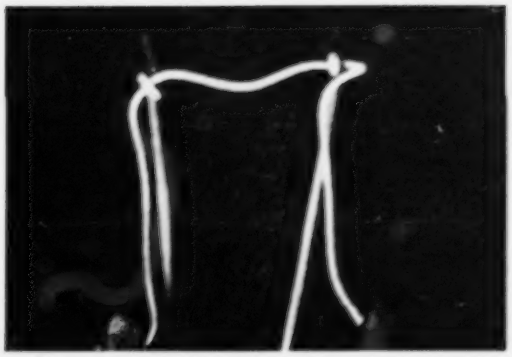
85 hours age. No appreciable change in appearance due to impact.



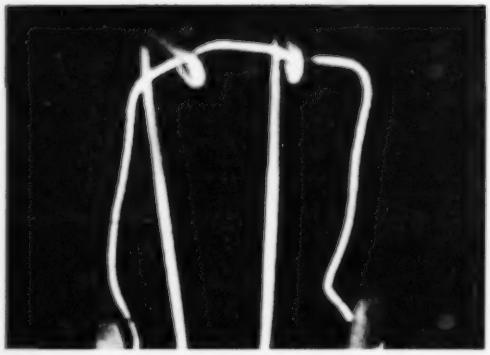
144 hours age. No appreciable change in appearance due to impact. Note normal deformation of filament around support posts consistent with aging.

TEST PARAMETERS
1600 g
1.6 msec
0 volts d.c.
x21 mag.

Figure 5 Filament After Impact (cont'd)

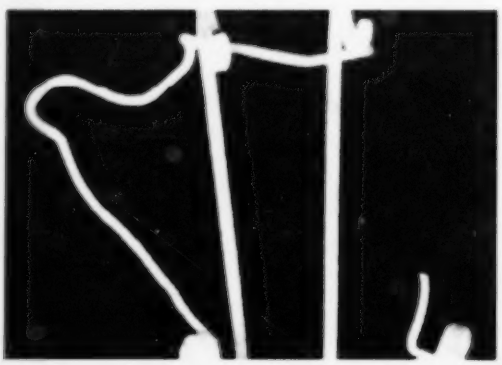


New filament. No appreciable sign of deformation.



48 hours age. No appreciable deformation due to impact.

85 hours age. No appreciable deformation due to impact.



144 hours age. No sign of local stretch, but cold fracture has occurred.

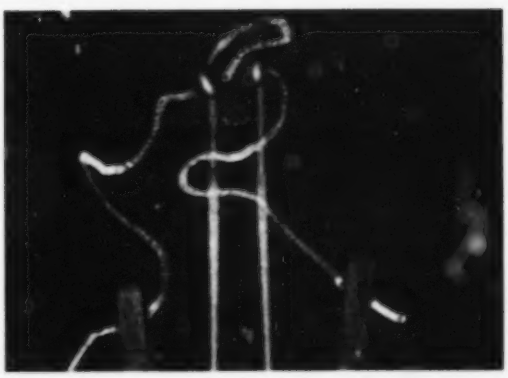
TEST PARAMETERS
3300 g
1.0 msec
0 volts d.c.
x21 mag.

Figure 5 Filament After Impact (cont'd)

This new filament (x17), showing both cold general deformation and local stretch, could be mistaken for a hot filament subjected to low impact.

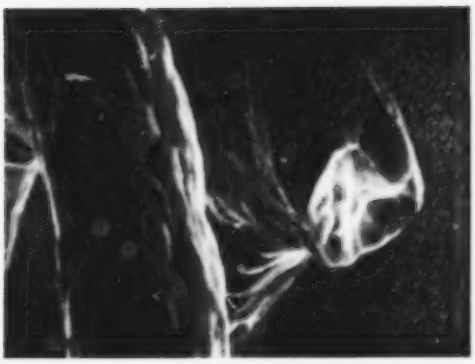
Impact at approximately 4000 g,
0.35 msec at 0 volts d.c.

This new filament (x14), which flailed violently under the influence of resonance, shows severe general deformation and local stretch not apparent in the new hot filaments shown in Figure 5.

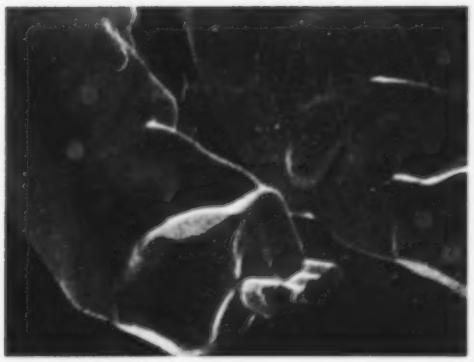


Impact at approximately 4000 g,
0.28 msec at 28 volts d.c.

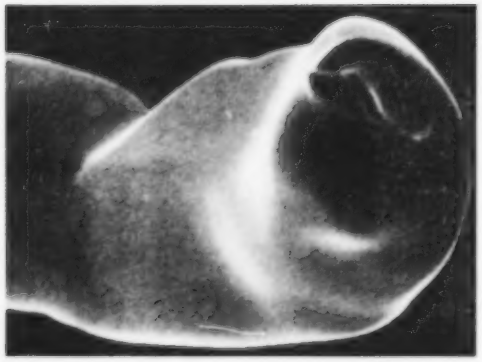
Figure 6 Filament Excited by Resonance



Cold fractured filament (x2500), after impact at 1400 g, 1.5 msec. Note the typical intergranular fracture face.

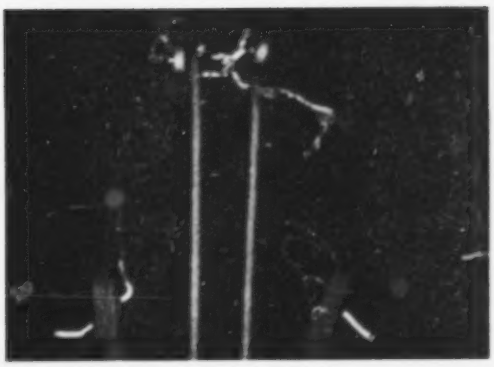


Severely notched cold fractured filament (x2100). Note the distinct sharp intergranular fracture face.



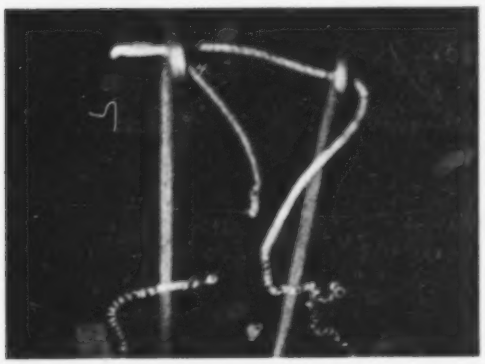
Severely notched cold fractured filament (x2800). Note the extreme reduction in cross-section at the fracture face.

Figure 7 Cold Fractures



Filament (x14) after hot fracture. Violent flailing has occurred due to resonance.

Fracture face (x1400). Note rounded appearance and "aneurism".



Filament (x21) after hot fracture.

Fracture face (x210). Note rewelding of broken segments.

Examples of hot fracture faces (x2800 left; x2100 right). Note rounded fracture edges.

Figure 8 Hot Fractures

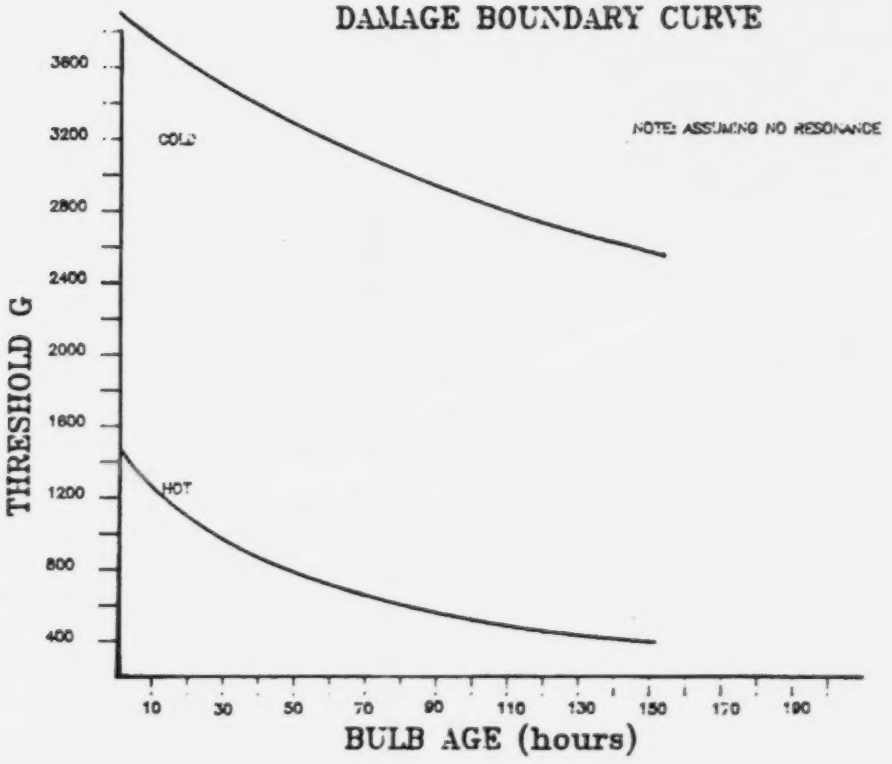


Figure 9 Age vs. Impact Boundaries

9. Illumination Times

If, as a result of some initial impact, a warning light receives a signal to change state and has time to do so prior to final impact, then the light will indicate a condition that did not exist prior to initial impact, i.e. a "false" signal.

Tests have established that the GE327 requires approximately 50 msec to reach incandescence (or lose incandescence) from the time voltage is applied (or removed); by comparison, the GE313 requires approximately 50 msec from power "on" and 100 msec from power "off".

When the total aircraft impact sequence is of shorter duration than these times, a "false" signal is impossible, but when the impact is of longer duration, "false" signals could be generated.

Longer duration crashes are generally of lower g levels but local impact forces at the instrument panel capable of causing damage to the bulbs typically occur at the beginning of a single impact crash sequence, therefore the likelihood of a false reading is reduced. False indications are more likely to occur in the case of multiple impact, e.g. wire, tree or tower strike, accidents.

10. Procedures

On-Site

On-site activity consists primarily of identifying selected light bulbs and removing them for subsequent examination.

It will prove useful in conducting a comparative analysis to examine as large a number of bulbs as possible, therefore it is preferable to remove too many bulbs rather than too few.

On-site analysis should be kept to a minimum.

The following guidelines are suggested:

1 The complete mounting assembly or panel should be removed as a unit whenever possible. Do not remove single bulbs unless absolutely necessary.

2. If it is absolutely necessary to remove individual bulbs, note the exact location of each bulb, secure it in place with tape in order to maintain its position relative to the group of bulbs, and apply an identification tag or tape to each.

3. Place groups of bulbs or individual bulbs in suitable protective envelopes or containers. Avoid damage due to handling or shipping.

4. Send bulbs, with a completed Light Bulb Field Information Sheet (Figure 10), to appropriate regional laboratory for detailed examination.

Regional Laboratory

The regional laboratory may remove the individual bulbs from their next assemblies and inspect them under an optical microscope to determine the general state of the filament or it may forward the assemblies to the specialized laboratory.

The following guidelines for examination are suggested:

1. Refer to the documents from the on-site investigation.

2. Remove the individual bulbs, making sure that the identification tag or tape is preserved.

3. Examine each bulb individually under a microscope having at least x30 magnification. Note condition of the filament. As a precaution, photograph selected bulbs through the microscope, if desired.

4. Never attempt to remove the glass envelope from a bulb.

5. Record findings on the Light Bulb Analysis Laboratory Checklist (Figure 11), forward with carefully packed bulbs, photographs and other relevant information, to the specialized laboratory for confirmation of findings.

Specialized Laboratory

The specialized laboratory typically examines selected bulbs, with the glass removed, under a scanning electron microscope and relates the findings to all other known facts about the accident being investigated. In this way, the light bulb physical condition can be used to infer the bulb operating condition ("on" or "off") immediately prior to impact; from this, the aircraft parameters prior to impact can be deduced.

Each specialized laboratory has its own set of equipment, its own staff members with their individual skills and experience, and its own distinctive history of past investigations. No general procedure which could apply to all such laboratories is offered, but a few practical suggestions based on Canadian experience are noted below:

1. In case the internal parts of the bulb are damaged during the removal of the glass, selected bulbs must be photographed through the glass as a precautionary measure.

2. To remove the glass from the metal base, a form of small glass cutter has been found satisfactory. Hold bulbs with the metal base up so that the glass falls freely away from the filament when cut.

3. Glass removal technique can be developed using sample bulbs until the laboratory specialist feels comfortable in carrying out this operation.

4. During glass removal, small fragments of glass occasionally adhere to the filament and other internal parts due to static electricity. These should not be confused with glass that has fused to internal parts during hot impact.

5. To supplement the information in this manual, each specialized laboratory should obtain a copy of "Light Bulb Filament Impact Dynamics" (TP 6254E) by applying to:

Transportation Safety Board of Canada
Engineering Branch
P.O. Box 9120
Alta Vista Terminal
Ottawa, Ontario
K1G 3T8

11. Final Analysis

Although the analysis of bulbs alone can yield much information, this must be checked against other known facts for confirmation of findings or to eliminate ambiguities or misinterpretations.

The checklist and information sheet are invaluable sources of supplementary information and must be consulted during the final analysis.

Where a number of indicator bulbs are known to have been subjected to essentially the same forces during impact, e.g. all bulbs in an annunciator panel, it is strongly recommended that they be analyzed as a group so that cross-checks can be accomplished. The comparative analyis is increasingly important in low g-level accidents where damage is minimal. In this way confidence in the individual analyses is enhanced.

Similarly, it is recommended that where two or more bulbs are provided to illuminate a single indicator, these bulbs be analyzed together.

Investigator _____ Aircraft _____ Date _____

AIRCRAFT IMPACT SUMMARY
WARNING SYSTEM LIGHT GENERAL CONDITIONS

Figure 10 Light Bulb Analysis Field Information Sheet

Investigator _____ Aircraft _____ Date _____

Ref. No.	Function	Bulb Type	Glass Intact?	Filament Fracture?	Deform.		Estimated age	Comments
					gen	loc		

Figure 11 Light Bulb Analysis Laboratory Checklist

Transports Canada Transport Canada

TP 6255F

Analyse des filaments d'ampoule
Aide à la recherche sur les accidents d'avion

Préparée par

Bureau de la sécurité des transports du Canada
(anciennement Bureau canadien de la sécurité aérienne)

Mars 1985
Réimprimée après révision : Février 1991

Also available in English under the title: "A Guide to Light Bulb Analysis – In Support of Aircraft Accident Investigation", TP 6255E.

Transports Canada Transport Canada

FORMULE DE DONNÉES POUR PUBLICATION

1. N° de la publication de Transports Canada	2. N° de l'étude	3. N° de catalogue du destinataire
TP 6255F	6372	

4. Titre et sous-titre	5. Date de la publication
Analyse des filaments d'ampoule Aide à la recherche sur les accidents d'avion	Mars 1985. Réimpression avec révision, février 1991
	6. N° de document de l'organisme exécutant

7. Auteur(s)	8. N° de dossier - Transports Canada
M.R. Poole, M. Vermij	D1455-129-5

9. Nom et adresse de l'organisme exécutant	10. N° de dossier - TPSGC
Bureau de la sécurité des transports du Canada Direction de l'ingénierie C.P. 9120 Alta Vista Ottawa, Ontario K1G 3T8	14SD.T8200-4-4572
	11. N° de contrat - TPSGC ou Transports Canada T8200-4-4572

12. Nom et adresse de l'organisme parrain	13. Genre de publication et période visée
Centre de développement des transports (CDT) 800, boul. René-Lévesque Ouest Bureau 600 Montréal (Québec) H3B 1X9	Manuel
	14. Agent de projet B. Myers

15. Remarques additionnelles (programmes de financement, titres de publications connexes, etc.)

Les informations contenues dans ce manuel sont tirées du rapport intitulé «Light Bulb Filament Impact Dynamics» (TP 6254E), mai 1985.

16. Résumé

Ce manuel s'adresse aux personnes chargées des enquêtes sur les accidents d'avion et concerne la technique d'investigation par analyse des filaments d'ampoule. Il décrit, illustrations à l'appui, le mécanisme de rupture des filaments d'ampoule chauds et froids soumis à des impacts contrôlés simulant les conditions d'un écrasement. Il est le fruit d'un programme de recherche mené conjointement par le Centre de développement des transports et la Direction technique de sécurité aérienne du Bureau canadien de la sécurité aérienne (maintenant le Bureau de la sécurité des transports du Canada).

17. Mots clés	18. Diffusion
Aéronefs, accidents, écrasements, filaments d'ampoule	

19. Classification de sécurité (de cette publication)	20. Classification de sécurité (de cette page)	21. Déclassification (date)	22. Nombre de pages	23. Prix
Non classifiée	Non classifiée	—	vi, 26	—

Transport Canada / Transports Canada

PUBLICATION DATA FORM

1. Transport Canada Publication No.	2. Project No.	3. Recipient's Catalogue No.
TP 6255F	6372	

4. Title and Subtitle	5. Publication Date
Analyse des filaments d'ampoule Aide à la recherche sur les accidents d'avion	March 1985. Reprinted with revisions, February 1991
	6. Performing Organization Document No.
7. Author(s)	8. Transport Canada File No.
M.R. Poole, M. Vermij	D1455-129-5
9. Performing Organization Name and Address	10. PWGSC File No.
Transportation Safety Board of Canada Engineering Branch P.O. Box 9120 Alta Vista Terminal Ottawa, Ontario K1G 3T8	14SD.T8200-4-4572
	11. PWGSC or Transport Canada Contract No.
	T8200-4-4572
12. Sponsoring Agency Name and Address	13. Type of Publication and Period Covered
Transportation Development Centre (TDC) 800 René Lévesque Blvd. West Suite 600 Montreal, Quebec H3B 1X9	Instruction Manual
	14. Project Officer
	B. Myers

15. Supplementary Notes (Funding programs, titles of related publications, etc.)

The information contained in this manual is extracted from "Light Bulb Filament Impact Dynamics" (TP 6254E), May 1985.

16. Abstract

This manual is intended to assist aircraft accident investigators in the analysis of light bulb filaments. It describes and illustrates hot and cold bulbs subjected to controlled impact simulating an aircraft crash, and is based on a cooperative research program conducted by the Transportation Development Centre and the Aviation Safety Engineering Branch of the Canadian Aviation Safety Board (now the Transportation Safety Board of Canada).

17. Key Words	18. Distribution Statement
Aircraft, accident, crash, light bulb filament	

19. Security Classification (of this publication)	20. Security Classification (of this page)	21. Declassification (date)	22. No. of Pages	23. Price
Unclassified	Unclassified	—	vi, 26	—

Avant-propos

Le facteur décisif ayant motivé la conduite d'expérimentations poussées sur le comportement au choc des filaments des lampes-témoins à bord d'un avion a été la constatation que leur étude pourrait contribuer grandement à la détermination des causes d'un accident.

Ce manuel est tiré du rapport TP 6254E, intitulé «Light Bulb Filament Impact Dynamics», qui décrit les travaux faits dans des conditions contrôlées par le Laboratoire technique du Bureau canadien de la sécurité aérienne (maintenant le Bureau de la sécurité des transports du Canada).

Il existe un corpus appréciable de connaissances sur le comportement des filaments d'ampoule de véhicules automobiles sous l'action d'un choc, la recherche ayant concerné directement les ampoules elles-mêmes, tandis que la présente recherche s'est intéressée plutôt au comportement des filaments sous l'action des forces d'inertie.

Table des matières

1. Objectif de la recherche 1
2. Facteurs à prendre en compte 2
3. Classification de l'ampoule 3
4. Orientation au moment de l'impact 4
5. Tension appliquée 6
6. Nature et violence du choc 8
7. Effet de vieillissement 9
8. Analyse des filaments après l'impact 12
9. Temps de montée à incandescence 21
10. Marche à suivre 22
11. Interprétation des résultats 24

Liste des figures

Figure 1 Constitution des ampoules 5
Figure 2 Exemples de filament grillé 7
Figure 3 Courbe caractéristique de l'évolution des forces d'accélération dans le temps 8
Figure 4 Formation de «crans» 10
Figure 5 État du filament après un choc 13
Figure 6 Filament excité à la fréquence de résonance 17
Figure 7 Exemples de rupture à froid 18
Figure 8 Exemples de rupture à chaud 19
Figure 9 Courbes limites caractéristiques de seuil d'endommagement en fonction de l'âge du filament 20
Figure 10 Constatations sur le terrain intéressant l'analyse des filaments d'ampoule 25
Figure 11 Tableau récapitulatif de l'analyse en laboratoire des filaments d'ampoule 26

1. Objectif de la recherche

L'analyse des lampes et voyants d'éclairage et d'avertissement faisant partie de la planche de bord d'un avion accidenté peut aider à déterminer l'état des circuits électriques correspondants juste avant l'accident. C'est là un facteur qui peut être important dans la conduite des investigations sur les causes de l'accident.

L'information obtenue peut servir à :

1. déterminer les paramètres de fonctionnement de l'avion avant l'écrasement;
2. évaluer la violence du choc.

L'enquête dans ce domaine se fera en trois étapes :

1. examen sommaire des lampes et voyants sur les lieux de l'accident et enlèvement de ceux-ci;
2. remise à un laboratoire régional aux fins d'une analyse sous microscope de la nature et de l'ampleur des déformations subies par les filaments;
3. analyse détaillée par un laboratoire spécialisé.

2. Facteurs à prendre en compte

Les facteurs à prendre en compte dans l'analyse des filaments d'ampoule sont indiqués ci-dessous. Ils sont repris séparément dans les pages suivantes, avec illustrations à l'appui :

1. type et fabricant de l'ampoule;
2. orientation de l'ampoule par rapport à la trajectoire de l'avion au moment de l'écrasement;
3. tension appliquée durant les événements menant à l'écrasement;
4. nature et violence du choc;
5. degré de vieillissement.

3. Classification de l'ampoule

Les trois types d'ampoules couramment utilisées dans le domaine aéronautique sont illustrées à la figure 1.

Les plus répandus, types 327 et 313, sont à filament unique spiralé sur deux supports. C'est l'ampoule 327, fabriquée par General Electric, qui a surtout été utilisée pour la recherche, étant donné qu'elle se trouve dans plusieurs types de planches de bord.

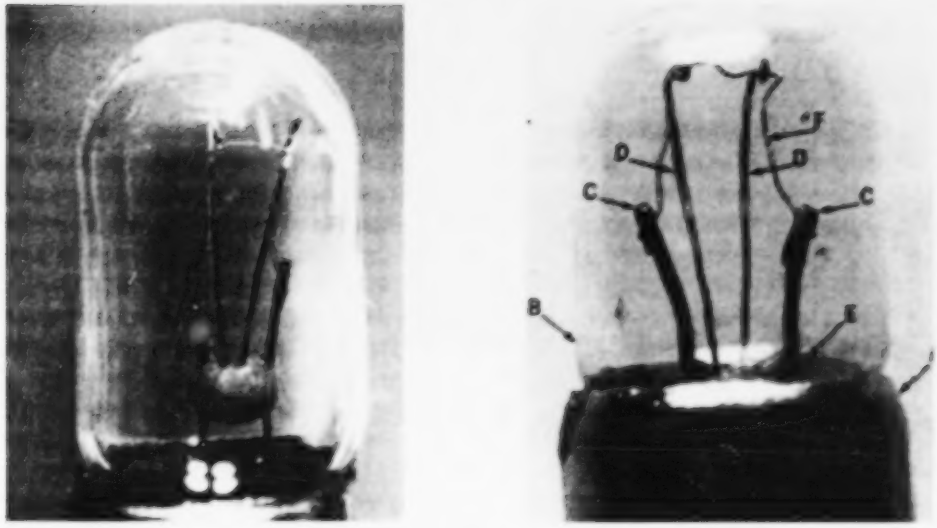
Par suite de différences de conception, de fabrication, et de constitution, l'endommagement causé aux filaments d'ampoules peut varier dans une certaine mesure, mais le principe de base reste valable et peut servir *mutatis mutandis* dans l'analyse d'ampoules autres que du type GE327.

Dans la plupart des cas, les filaments étudiés sont constitués de tungstène pur à 99,98 p. cent. Mais les propriétés peuvent varier considérablement d'une ampoule à l'autre, selon la structure microscopique du filament, les dopants utilisés et la méthode de fabrication.

4. Orientation au moment de l'impact

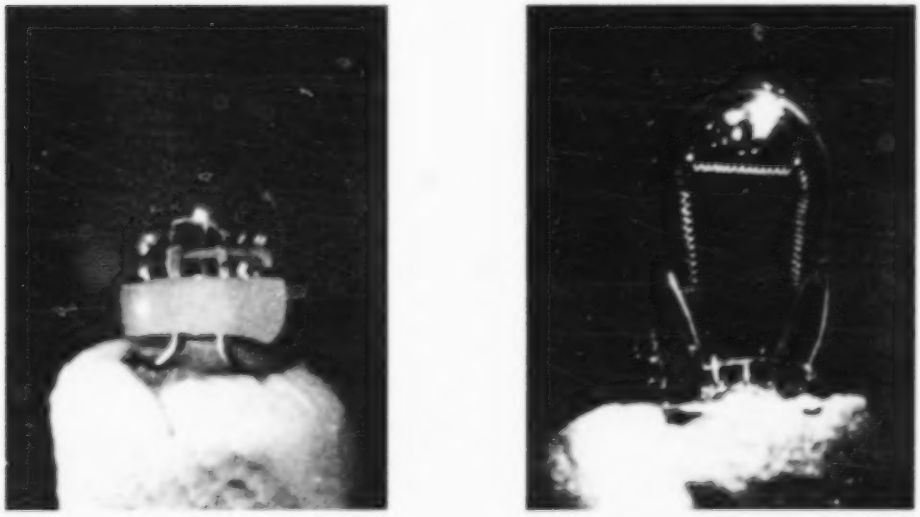
Le comportement du filament sous l'action d'un choc dépend en très grande partie des mouvements vibratoires auxquels ont été soumis les deux supports, notamment en présence de résonance. C'est pourquoi les essais ont été faits de manière que les chocs les plus violents s'exerçant sur les supports soient dirigés dans le plan de ceux-ci et perpendiculaires à eux.

Un choc d'une intensité donnée s'exerçant dans toute autre orientation se traduit par un déplacement moindre des supports, et il faut donc un choc plus violent pour produire un déplacement de même grandeur.



Filaments spiralés avec supports
Constitution d'une ampoule GE-313 (à gauche) et GE-327 (à droite)

A – culot
B – ampoule de verre
C – entrées de courant
D – supports de filament
E – pied de lampe
F – filament



Filament spiralé sans supports

Filament bispiralé avec supports

Figure 1 Constitution des ampoules

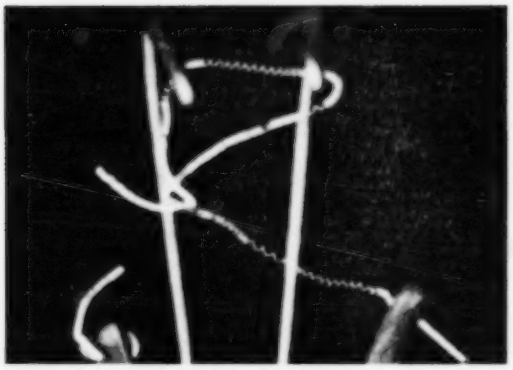
5. Tension appliquée

À part quelques exceptions dûment observées, le présent manuel intéresse les circuits à courant continu 28 volts très répandus dans le domaine aéronautique. Le comportement d'un filament sous l'action d'un choc varie sensiblement selon qu'il est traversé ou non par un courant électrique.

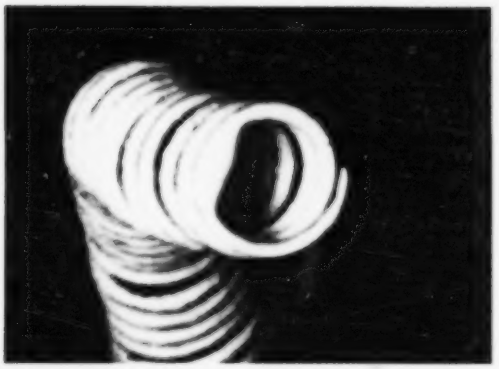
Dans le premier cas, il est chaud et relativement ductile, dans le deuxième, froid et relativement fragile. Donc, soumis à l'action d'un choc, un filament chaud subira une déformation permanente, ce qui ne sera pas le cas d'un filament froid. Une déformation du filament non accompagnée d'un relâchement des spires est appelé ici «déformation généralisée»; elle devient une «déformation localisée» si un relâchement des spires est constaté. Le manuel est abondamment illustré de ces deux types de déformation.

Lorsqu'un filament sous tension vibre sous l'action d'un choc violent, il est possible que deux ou plusieurs de ses parties se touchent, lui causant un court-circuit qui le grille. Des exemples sont illustrés à la figure 2.

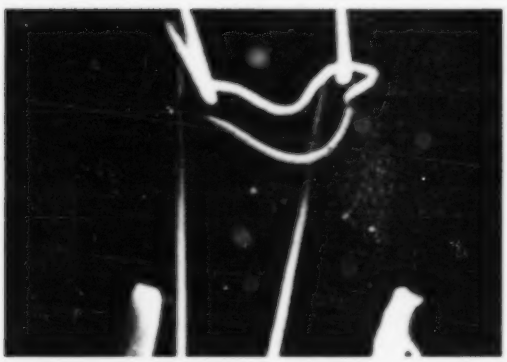
Il est également possible que le filament grille suite à un défaut du circuit électrique (surtension) sans qu'il y ait nécessairement un impact violent, comme illustré à la figure 2. Dans ce cas, aucune déformation du filament ne sera constatée, la rupture se faisant dans la plupart des cas à l'une ou l'autre des entrées de courant, ou aux deux. Le filament peut aussi griller sans qu'il y ait ni surtension, ni impact violent, sous l'effet d'une surchauffe localisé résultant d'un vieillissement qui se manifeste par l'apparition de «crans» prononcés, comme illustré à la figure 2.



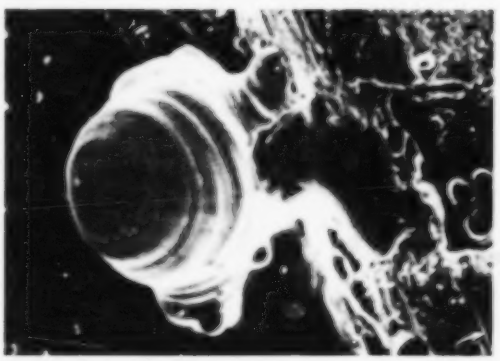
Court-circuit dans un filament occasionnant une déformation généralisée et localisée. Grossissement 17.



Même filament montrant le phénomène d'«anévrisme» caractéristique. Grossissement 350.



Cas de forte surtension occasionnant la rupture du filament aux deux entrées de courant. Grossissement 21.



Grossissement 700 d'un point d'entrée de courant. Remarquez les signes de fusion.

Cas typique de filament grillé résultant d'un vieillissement accompagné de «crans» prononcés. L'apparition de ces derniers a été accélérée, en l'occurrence, par un courant continu 38 V c.c. Remarquez la forme arrondie des lèvres de la rupture et la poche formant l'«anévrisme». Grossissement 30.

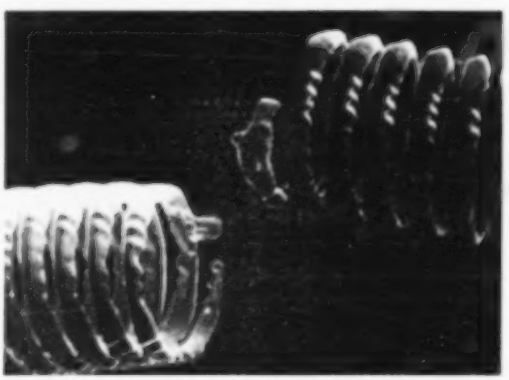


Figure 2 Exemples de filament grillé

6. Nature et violence du choc

Lorsqu'un avion s'écrase, il perd toute son énergie cinétique en un temps très court par le jeu des forces d'accélération négative dues à la pesanteur. Ces forces peuvent atteindre plusieurs milliers de G et évoluent dans un temps très bref, entre une fraction de milliseconde et plusieurs secondes. Il est d'usage courant de considérer la moyenne des forces d'accélération qui se sont exercées sur l'avion pendant l'écrasement, mais il est entendu que la force qui a pu s'exercer sur une partie de l'avion, la planche de bord, par exemple, est bien différente de cette moyenne. Ce sont les forces localisées qu'il faut prendre en compte dans l'analyse des filaments.

La figure 3 montre l'évolution des forces d'accélération en fonction du temps, dans le cas d'un exemple type.

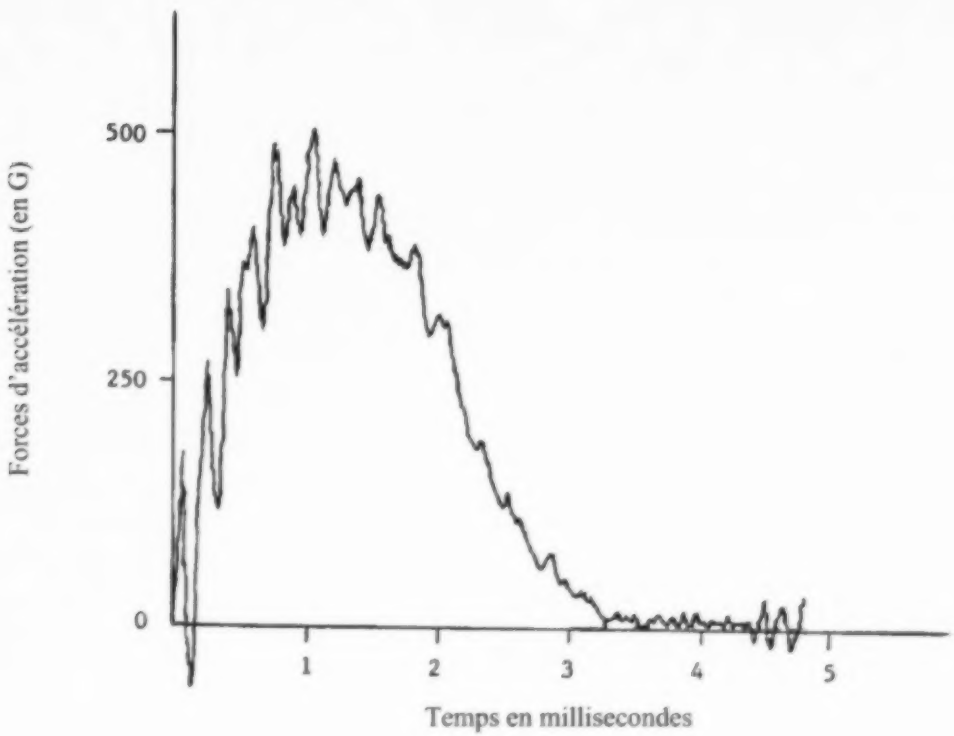


Figure 3 Courbe caractéristique de l'évolution des forces d'accélération dans le temps

7. Effet de vieillissement

Lorsqu'un courant continu traverse un filament de tungstène, il provoque un vieillissement qui se manifeste sous deux formes :

1. Certains cristaux du filament connaissent une croissance au détriment des autres plus petits, réduisant ainsi le nombre total de cristaux présents et provoquant l'affaiblissement du filament.

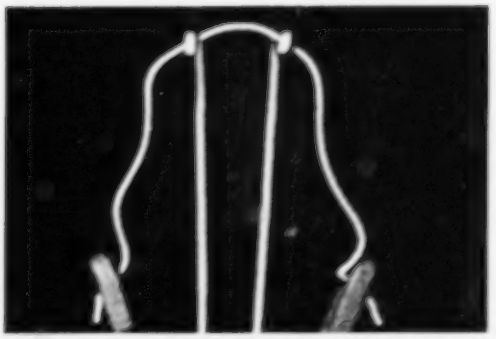
2. Les ions de tungstène commencent à migrer préférentiellement vers les niveaux les plus favorables, formant ce qui apparaît être comme des «crans».

Ce phénomène se produit tout au long du filament, sauf à proximité des supports et des entrées de courant, là où la température est localement moindre en raison de l'absorption de chaleur par ces éléments. Les «crans» deviennent de plus en plus marqués avec le temps, réduisant progressivement la section du filament là où ils se forment. L'effet de ces deux facteurs d'affaiblissement du filament, la migration des ions et la formation de «crans», se conjugue donc dans le temps.

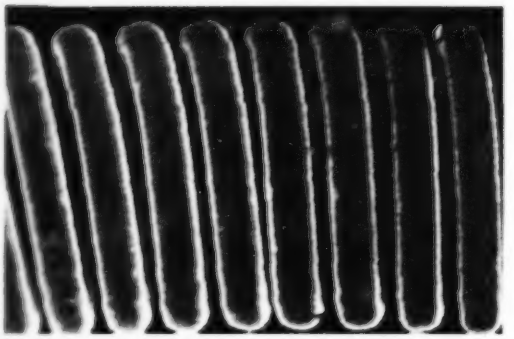
La formation de «crans» est une fonction complexe de la tension appliquée, étant d'autant plus lente ou rapide que cette tension est faible ou élevée.

Une alimentation alternative ne provoque pas la formation de «crans», sauf à proximité des supports et des entrées de courant où, à cause de l'absorption de chaleur par ces éléments, un gradient thermique existe.

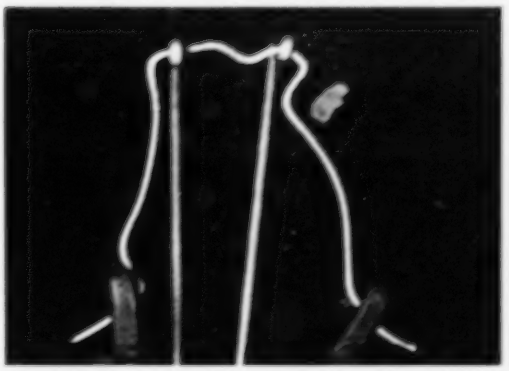
La figure 4 illustre divers exemples de vieillissement dû à la formation de «crans» et à d'autres phénomènes. L'âge correspond au nombre d'heures durant lesquelles le filament a été exposé aux niveaux vibratoires les plus intenses mesurés en vol dans la cabine de pilotage, la tension appliquée au filament étant de 28 volts c.c.



Filament neuf de constitution lisse partout. Grossissement 14.



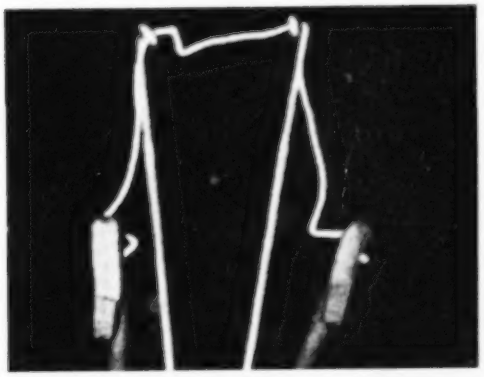
Le même filament grossi 700 fois. Remarquez la surface lisse.



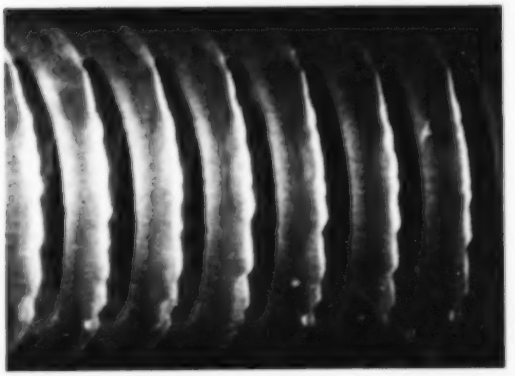
Filament après 144 h d'usage. Remarquez les déformations à proximité des supports. Grossissement 14.

Le même filament grossi 700 fois montrant la formation de «crans» peu accentués.

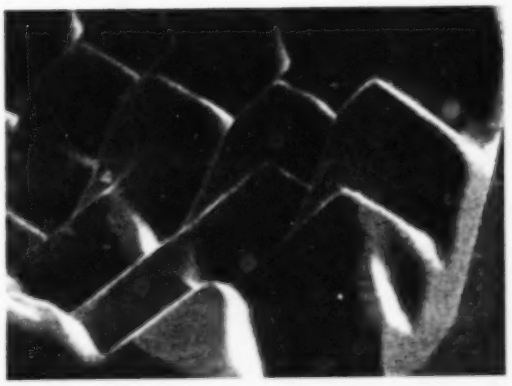
Figure 4 Formation de «crans»



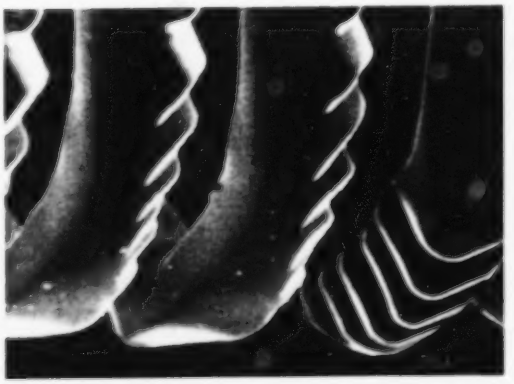
Filament après 250 h d'usage. Les déformations à proximité des supports sont très accentuées. Grossissement 14.



Le même filament grossi 700 fois. Remarquez la croissance des «crans».



Filament gravement marqué par les «crans», au bout de 500 h. Grossissement 1 750.



Filament gravement marqué par les «crans» après 77 h sous une tension de 38 V c.c., confirmant le rapport qui existe entre la croissance des «crans» et la tension appliquée. Grossissement 1 750.

Figure 4 Formation de «crans» (suite)

8. Analyse des filaments après l'impact

Cette partie traite de l'effet constaté sur le filament suite à un choc, et que l'on peut analyser afin de pouvoir déterminer a posteriori certains des paramètres de fonctionnement de l'avion, tout de suite avant et durant l'écrasement.

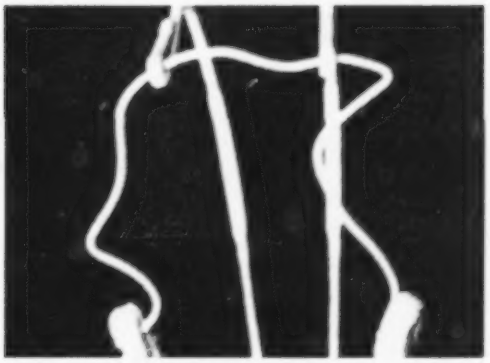
La figure 5 illustre le rapport qui existe entre tension appliquée, vieillissement et violence du choc.

La figure 6 montre l'effet d'un facteur supplémentaire qui est la résonance et qu'il faut prendre en compte lorsque l'ampoule vibre à des fréquences proches de la fréquence naturelle propre de l'ensemble filament/supports. On sait que celui-ci se mettra à vibrer sous l'action d'un choc unique d'une durée égale ou inférieure à sa période de vibration.

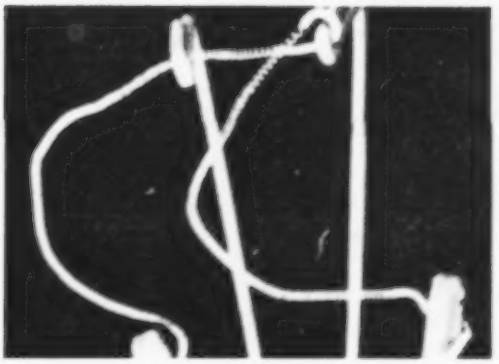
L'aspect caractéristique d'une rupture de filament à froid et à chaud est illustré aux figures 7 et 8, respectivement.

La figure 9 montre les courbes limites des forces de rupture en fonction de l'âge du filament, dans le cas d'une rupture à chaud et à froid. Produites à partir du résultat des essais, elles montrent la résistance à l'impact plus élevée d'un filament neuf n'ayant subi aucun réchauffement.

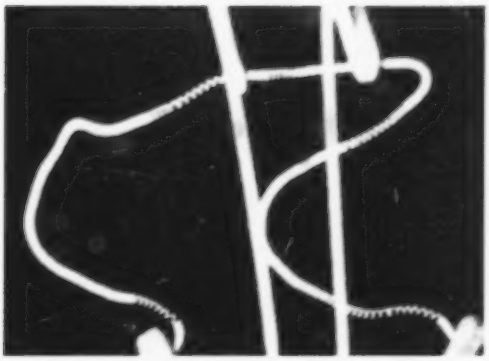
La partie 9 traite d'un autre facteur utile à l'analyse des filaments d'ampoule : les temps de montée à incandescence.



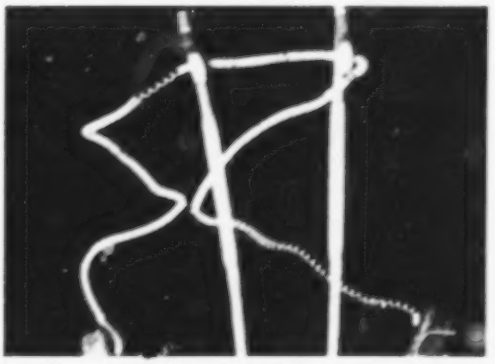
Filament neuf n'ayant subi qu'une déformation généralisée.



48 heures d'usage. Déformation généralisée plus prononcée et quelques déformations localisées.



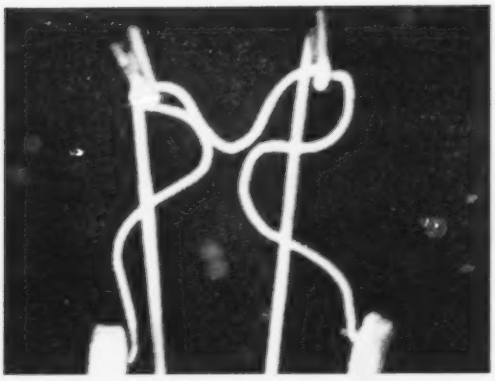
85 h d'usage. Déformation généralisée encore plus prononcée et quelques déformations localisées.



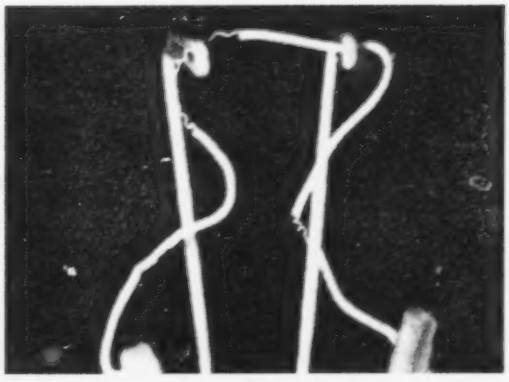
144 h d'usage. Déformation généralisée grave et déformation localisée accrue.

Paramètres
1 800 G
1 ms
28 V c.c.
Grossissement 21

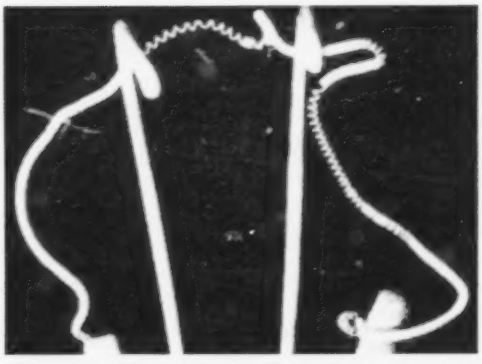
Figure 5 État du filament après un choc



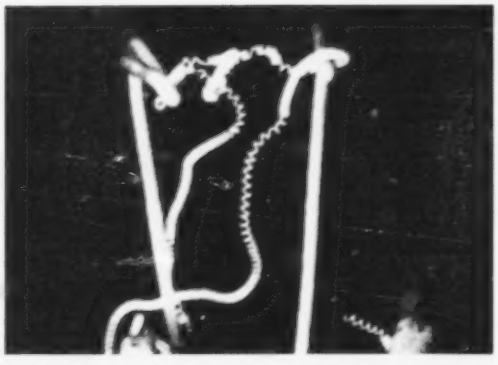
Filament neuf. La déformation généralisée y est plus prononcée par suite d'un choc plus violent. Déformation localisée négligeable.



48 h d'usage. Les déformations généralisée et localisée y sont très évidentes.



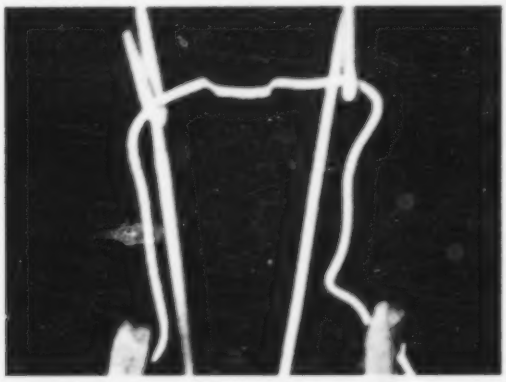
85 h d'usage. Les déformations généralisée et localisée y sont encore plus fortes.



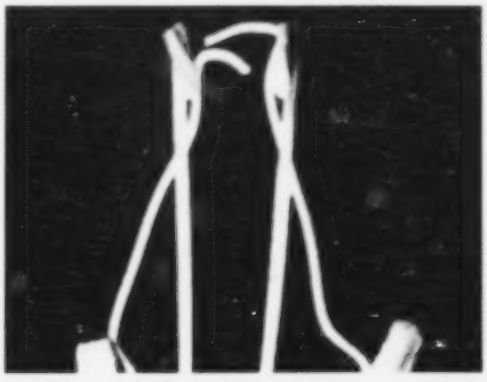
144 h d'usage. État de déformation généralisée et localisée extrême, accompagnée de rupture.

Paramètres
3 500 G
1 ms
28 V c.c.
Grossissement 21

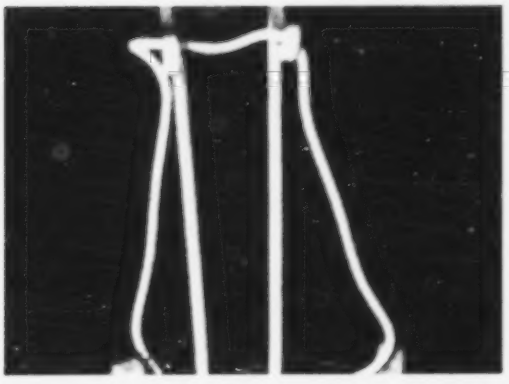
Figure 5 État du filament après un choc (suite)



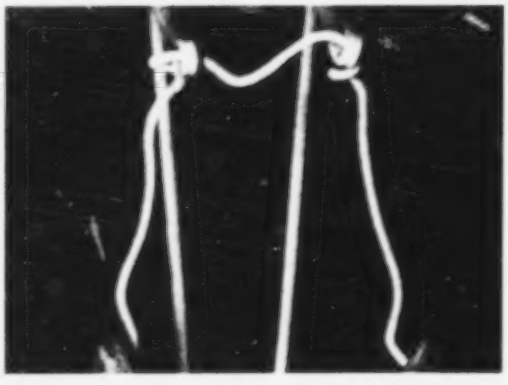
Filament neuf. Aucun signe de déformation due au choc. Légère anomalie au milieu du filament due à un défaut de fabrication.



48 h d'usage. Pas de déformation évidente mais rupture à froid, contrairement à la norme pour une ampoule de cet âge.



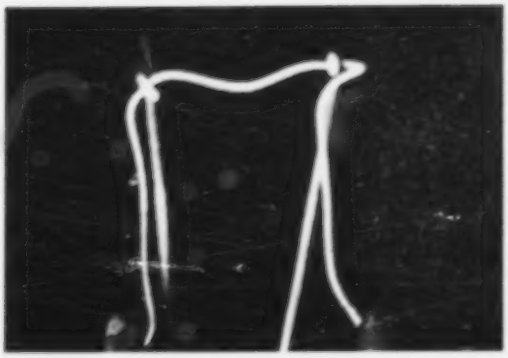
85 h d'usage. Pas de changement visible malgré le choc.



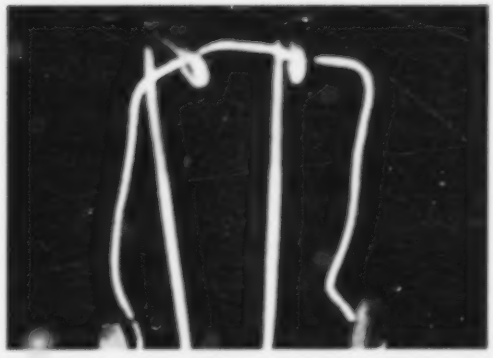
144 h d'usage. Pas de changement visible malgré le choc. Déformation du filament autour des supports, considérée comme normale pour un filament de cet âge.

Paramètres
1 600 G
1,6 ms
0 V c.c.
Grossissement 21

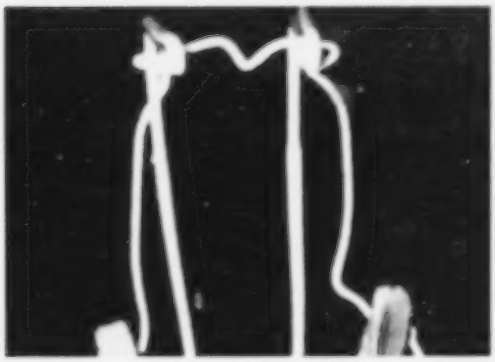
Figure 5 État du filament après un choc (suite)



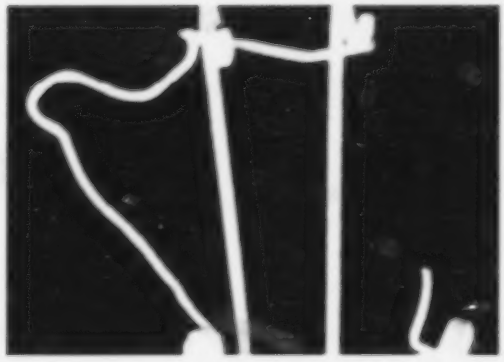
Filament neuf. Aucun signe de déformation.



48 h d'usage. Pas de déformation visible malgré le choc.



85 h d'usage. Pas de déformation visible malgré le choc.



144 h d'usage. Aucun signe de déformation localisée, mais rupture à froid.

Paramètres
3 300 G
1 ms
0 V c.c.
Grossissement 21

Figure 5 État du filament après un choc (suite)

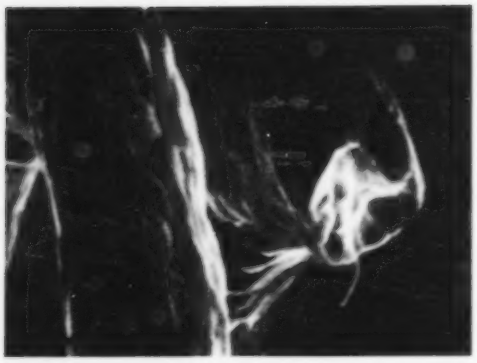
Choc à 4 000 G environ, d'une durée de 0,35 ms sous 0 V c.c.

Filament neuf (grossissement 17) montrant une déformation tant généralisée que localisée. État équivalent à celui d'un filament sous tension soumis à un choc peu violent.

Filament neuf (grossissement 14) ayant vibré violemment à la fréquence de résonance. On constate une déformation tant généralisée que localisée grave, contrairement au cas des filaments neufs sous tension illustrés à la figure 5.

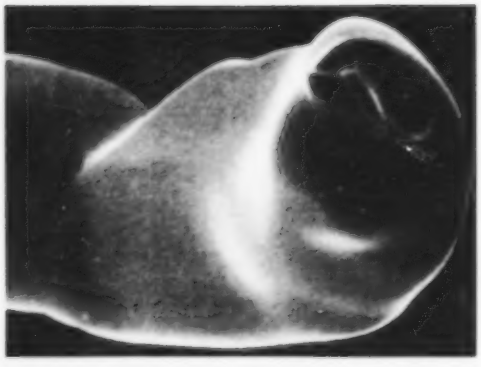
Choc à 4 000 G environ, d'une durée de 0,28 ms, sous 28 V c.c.

Figure 6 Filament excité à la fréquence de résonance



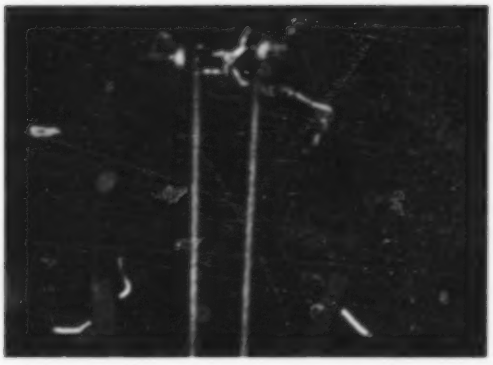
Rupture à froid d'un filament (grossissement 2 500) à 1 400 G d'une durée de 1,5 ms. Remarquez la rupture intergranulaire sur la face visible du filament.

Rupture à froid d'un filament profondément marqué par des «crans». La rupture intergranulaire y est très bien marquée. Grossissement 2 100.

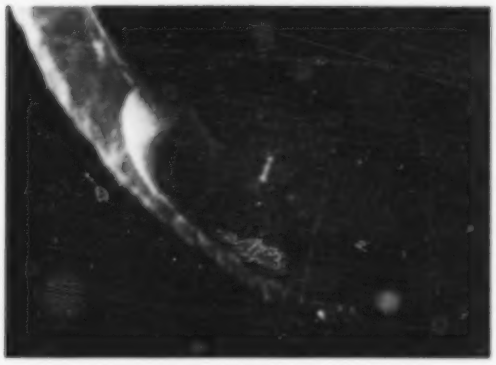


Rupture à froid d'un filament profondément marqué de «crans». Notez la striction très marquée du filament au droit de la rupture. Grossissement 2 800.

Figure 7 Exemples de rupture à froid



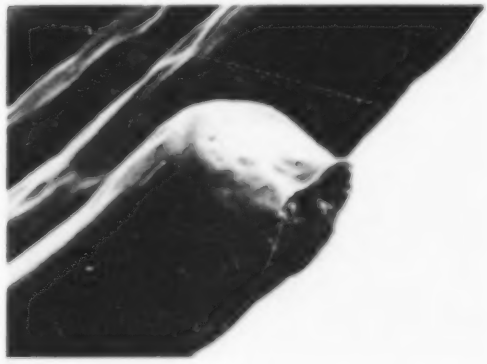
Rupture à chaud d'un filament (grossissement 14). Fortes vibrations aux fréquences de résonance.



Rupture à chaud d'un filament (grossissement 1 400). Remarquez l'aspect arrondi et la poche formant l'«anévrisme».

Rupture à chaud d'un filament. Grossissement 21.

Rupture à chaud (grossissement 210). Remarquez la ressoudure des spires fracturées.



Vues de la face fracturées à chaud d'un filament. Grossissement 2 800 à gauche, 2 100 à droite. Remarquez l'aspect arrondi des lèvres.

Figure 8 Exemples de rupture à chaud

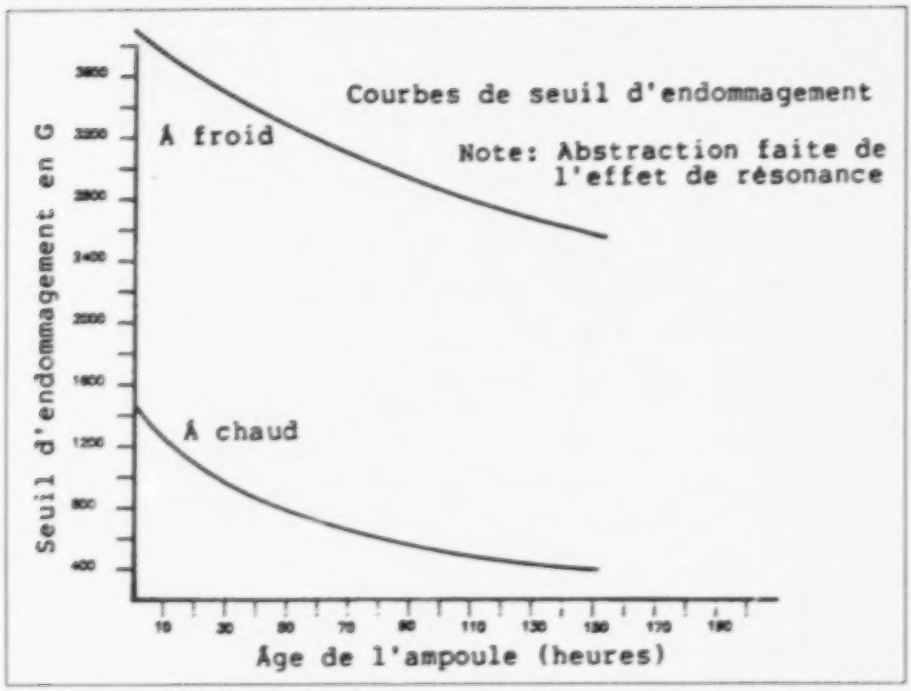


Figure 9 Courbes limites caractéristiques de seuil d'endommagement en fonction de l'âge du filament

9. Temps de montée à incandescence

Lorsqu'un voyant a reçu le signal de changer d'état (s'allumer ou s'éteindre) à la suite d'un choc initial et qu'il en a effectivement eu le temps avant l'impact final, cela signifie que son indication correspond à une situation qui n'existait pas avant le choc initial, et que, à ce titre, il s'agit d'une «fausse» indication.

Les tests ont montré qu'il faut à l'ampoule GE 327 approximativement 50 ms pour atteindre l'incandescence (ou pour la perdre) à partir du moment où le courant circule (ou est interrompu), comparativement aux 50 et 100 ms, respectivement, pour l'ampoule GE 313.

Lorsque la durée totale de l'écrasement de l'avion est inférieure à ces temps-là, le risque de «fausse» indication est nul, mais il ne l'est plus dans le cas contraire.

À un écrasement qui, toutes proportions gardées, s'étire dans le temps correspondent généralement des forces G plutôt faibles. En revanche, les forces s'exerçant sur la planche de bord et de nature à endommager les filaments des ampoules se produisent habituellement au tout début de l'écrasement, généralement du type à choc unique. Donc, le risque d'une «fausse» indication est réduit d'autant. Les accidents susceptibles de donner lieu à de «fausses» indications sont généralement du type à impacts multiples, où le choc initial s'est fait contre un obstacle quelconque : fil aérien, arbre, tour, etc.

10. Marche à suivre

Sur le terrain

Il s'agira surtout de sélectionner les ampoules à prélever aux fins d'analyse.

Pour que cette analyse puisse être aussi complète et générale que possible, il est préférable de prélever des ampoules en nombre suffisant, et plutôt plus que moins.

Le nombre d'analyses sur le terrain devrait être gardé au minimum.

La marche à suivre sera donc la suivante :

1 Enlever le panneau ou l'assemblage au complet, si cela est possible. N'enlever les ampoules une à une que s'il n'y a pas moyen de faire autrement.

2. Dans ce cas, repérer la position exacte de chaque ampoule, la remettre dans la position qu'elle occupait sur le panneau par rapport aux autres ampoules, l'y maintenir en place à l'aide d'un adhésif et attacher une étiquette à chaque ampoule.

3. Bien emballer les ampoules groupées ou séparées pour que la manutention et le transport se fassent sans encombre.

4. Envoyer le ou les colis au laboratoire régional approprié, accompagné du feuillet d'information illustré à la figure 10.

Laboratoire régional

Au laboratoire régional, les ampoules pourront être enlevées une à une du panneau et examinées sous un microscope optique dans le but de déterminer l'état général du filament. Ou bien, le laboratoire régional pourra envoyer le tout au laboratoire spécialisé.

La marche à suivre sera donc la suivante :

1. Prendre connaissance des feuillets accompagnant les colis.

2. Enlever les ampoules une à une en veillant à ne pas ôter l'étiquette.

3. Examiner les ampoules sous un microscope optique d'une puissance de grossissement d'au moins 30. Observer l'état du filament. À titre de précaution, il serait bon de photographier les cas les plus représentatifs.

4. Ne jamais tenter d'enlever le globe de verre.

5. Consigner les observations sur le feuillet illustré à la figure 11. Envoyer les ampoules soigneusement emballées, accompagnées de la documentation écrite

et photographique nécessaire, au laboratoire spécialisé aux fins d'un examen plus approfondi.

Laboratoire spécialisé

Le laboratoire spécialisé procède habituellement à l'examen attentif des ampoules, dont le globe de verre aura été ôté, sous un microscope électronique à balayage. Il fait ensuite la synthèse des résultats qu'il rapproche des autres données obtenues concernant l'accident considéré. D'après l'état physique de chacun des filaments examinés, il sera possible de déduire l'état du circuit correspondant, «Marche» ou «Arrêt», juste avant l'écrasement et, de là, déterminer les paramètres de fonctionnement de l'avion avant l'accident.

Concernant les laboratoires spécialisés, aucune directive ne leur est donnée sur la marche à suivre, vu que chacun d'eux dispose d'un matériel de recherche différent, que les chercheurs y ont des compétences différentes et qu'ils ont une façon de travailler bien à eux. Néanmoins, les quelques suggestions ci-dessous, fondées sur l'expérience acquise au Canada dans le domaine concerné, pourraient se révéler utiles :

1. Photographier l'intérieur des voyants prélevés avant de tenter d'en enlever le globe de verre, au cas ou cette manipulation aurait pour effet d'endommager les éléments que l'on veut soumettre à un examen plus poussé.

2. Voici une technique d'enlèvement du globe qui a été trouvée utile : Tenir l'ampoule par le culot, le globe dirigé vers le bas; celui-ci en tombant ne heurte pas l'intérieur de l'ampoule.

3. À titre de familiarisation avec le mode opératoire, utiliser cette technique d'enlèvement du globe de verre sur des ampoules de type identique.

4. Parfois, sous l'action de l'électricité statique, des fragments du globe de verre adhérent au filament ou à une des parties constituantes de l'ampoule. Il ne faudra pas les confondre avec les autres parties du globe ayant fusionné. Avec l'intérieur de l'ampoule à l'occasion d'une rupture à chaud.

5. Pour compléter l'information contenue dans ce manuel, le laboratoire spécialisé devrait obtenir un exemplaire du rapport TP 6254E, intitulé «Light Bulb Filament Impact Dynamics», en s'adressant au :

Bureau de la sécurité des transports du Canada
Direction technique
B.P. 9120
Gare AltaVista
Ottawa, Ontario
K1G 3T8

11. Interprétation des résultats

L'information découlant de l'analyse des ampoules, bien que très utile en elle-même, doit être vérifiée et confirmée par recoupement.

À cet égard, le feuillet des constatations sur le terrain et le tableau récapitulatif des analyses en laboratoire seront d'une utilité certaine.

Les ampoules que l'on sait avoir été soumises à des forces d'écrasement identiques, les ampoules d'un même panneau avertisseur, par exemple, devront, est-il instamment recommandé, être analysées ensemble et vérifiées les unes par rapport aux autres. Ce type de bilan comparatif est d'autant plus crucial que l'on a affaire à un accident sans dommages matériels graves et n'intéressant que des forces G de faible intensité. Seule cette manière de procéder conférera au diagnostic le niveau de confiance qu'il mérite.

De même, il est recommandé que lorsque deux ampoules ou plus font partie d'un même indicateur, ces ampoules soient analysées ensemble.

Enquêteur _____ Aéronef _____ Date _____

SOMMAIRE DE L'ACCIDENT
ÉTAT GÉNÉRAL DES AMPOULES DU PANNEAU AVERTISSEUR

Figure 10 Constatations sur le terrain intéressant l'analyse des filaments d'ampoule

Enquêteur _____ Aéronef _____ Date _____

N° réf.	Fonction	Type d'ampoule	État du globe	État du filament	Déformation		Âge approx.	Observations
					généralisée	localisée		

Figure 11 Tableau récapitulatif de l'analyse en laboratoire des filaments d'ampoule